

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh zajištění energií pro rodinný domek

s využitím Stirlingova motoru

The Proposal to Ensure Energy for Family House

Using of the Stirling Engine

Student:

Jan Mendrygal

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Mendrygal**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Návrh zajištění energií pro rodinný domek s využitím Stirlingova motoru**
The Proposal to Ensure Energy for Family House Using of the Stirling Engine

Zásady pro vypracování:

Práce bude obsahovat:

Popis současného stavu teplovzdušných motorů a malých kogeneračních jednotek s těmito motory.
Rozbor možnosti uplatnění takové jednotky pro konkrétní rodinný dům.

Seznam doporučené odborné literatury:

Kysela, L., Míka, J., Kyselová, S. Teplárenství. Učební text. Katedra energetiky Ostrava, 2010.
Organ, J., A. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine, Cambridge University Press 2010, ISBN-10: 0521131790.
Míka, J. Teplovzdušné motory - motory budoucnosti. Text vypracovaný v rámci projektu CZ.1.07/1.1.00/08.0010, Ostrava 2013.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Míka, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



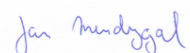

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 15.5. 2014



Jan Mendrygal

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15.5. 2014



Jan Mendrygal

Jméno a příjmení autora práce: Jan Mendrygal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Tísek 260, Tísek, 742 94

Poděkování

Touto formou bych chtěl velmi poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Míkovi, CSc. za spousty cenných rad, které mi poskytl během vypracování mé bakalářské práce a které mi umožnily zpracovat tuto práci v potřebném rozsahu a kvalitě.

Dále si mé poděkování zaslouží společnost MENERGO a.s., která mi umožnila v rámci stáže a mé přípravy bakalářské práce využít všechny výpočtové softwarové prostředky, které vlastní.

V neposlední řadě děkuji panu Ing. Rostislavovi Hegarovi, který se mi trpělivě věnoval jako jeden z tvůrců při vysvětlování principu fungování těchto výpočtových softwarů.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MENDRYGAL, J. *Návrh zajištění energií pro rodinný domek s využitím Stirlingova motoru: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 49 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Míka, J. CSc.

Bakalářská práce s výše uvedeným názvem se zabývá možností aplikace Stirlingova motoru pro zajištění tepelné a elektrické energie pro konkrétní rodinný dům. V úvodu práce jsou vysvětleny a popsány základní způsoby kombinované výroby elektrické a tepelné energie. V této části jsou popsány i technické principy jednotlivých způsobů kogenerační, třígenerační výroby. Velká pozornost je věnována principu fungování Stirlingova motoru. Pro vlastní návrh využití Stirlingova motoru pro konkrétní rodinný dům řeší tato práce v detailním měřítku tepelné ztráty, energetické bilance a vlastním návratnost zvoleného typu Stirlingova motoru s daným tepelným a elektrickým výkonem.

Klíčové slova: kogenerace, trigenerace, kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, mikrokogenerace, Stirlingův motor, VITOTWIN 300-W, ekonomická návratnost.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MENDRYGAL, J. *The Proposal to Ensure Energy for Family House Using of the Stirling Engine: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of energetic, Department of Control Systems and Instrumentation, 2014, 49 p. Thesis head: doc. Ing. Míka, J. CSc.

The thesis described above concerns the possible application of the Stirling Motor to evaluate the heating and electrical energy (requirements) for individual houses. In the introduction, the basic methods of combining the production of electric and heat energy are explained and described. This section also contains a description of the technical principles of the individual methods of both cogeneration and trigeneration production. Great emphasis is placed on the operating principles of the Stirling Motor. My own proposal for the use of Stirling Motors in individual houses is the focus of this work and is based on a detailed measurement of heat loss, energy evaluation and return on the selected type of Stirling Motor with a given power and heat output.

Obsah

Obsah	7
Seznam zkratk a symbolů	9
1. Úvod	10
2. Kogenerace	11
2.1. Princip kogenerace	11
2.2. Výroba elektřiny a tepla	11
2.3. Dělení kogenerační výroby	11
2.4. Oblasti použití	12
3. Kombinovaná výroba tepla a elektrické energie	14
3.1. Parní kogenerační jednotky	14
3.2. Kogenerační jednotky s plynovou turbínou	15
3.3. Kogenerační jednotky s pístovými spalovacími motory	16
4. Trigenerace	17
5. Mikrokogenerace	18
6. Stirlingův motor	18
6.1. Obecně	18
6.2. Historie	19
6.2.1 Vývoj	19
6.2.2 Současnost	21
6.3. Popis části Stirlingova motoru	22
6.2.3 Výměník tepla (Ohříváč)	22
6.2.4 Regenerátor	23
6.2.5 Výměník tepla (chladič)	24
6.2.6 Přemísťovací píst	24
6.4. Typy konfigurací Stirlingova motoru	25
6.2.7 Typ Alfa	26
6.2.8 Typ Beta	26
6.2.9 Typ Gama	27
6.5. Rozdíl mezi vznětovým motorem a Stirlingovým motorem	27
6.6. Výhody a nevýhody Stirlingových motorů	28
7. Řešený objekt	29
7.1. Popis objektu	29

7.2.	Výpočet tepelných ztrát objektu.....	31
7.3.	Výpočet roční potřeby tepla na vytápění	32
7.4.	Potřeba tepla na přípravu TV	34
7.5.	Teplo od spotřebičů.....	35
7.6.	Celková roční potřeba tepla	35
8.	Kogenerační jednotka Viessmann VITOTWIN 300-W	35
8.1.	Konstrukční provedení a funkce	36
9.	Křivka pokrytí tepelného výkonu jednotky	37
9.1.	Výpočet v programu.....	38
9.2.	Křivka tepelného výkonu	39
9.3.	Provozní hodiny	40
10.	Ekonomické zhodnocení instalace kogenerační jednotky	41
10.1.	Výpočet návratnosti se spotřebou elektrické energie	42
10.2.	Výpočet návratnosti s prodejem elektrické energie do sítě	42
11.	Závěr	44
12.	Seznam použité literatury	46
13.	Seznam tabulek a grafů:.....	48
14.	Seznam obrázků:.....	49

Seznam zkratek a symbolů

α_{int}	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
α_{ext}	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla na vnější straně
λ	[W/mK]	součinitel tepelné vodivosti
k_i	[W/m ² K]	součinitel prostupu tepla
Q_i	[W]	tepelné ztráty
D	[denostupňů]	denostupně
ε	[-]	opravný součinitel
E_v	[kWh]	roční potřeba tepla
t_{im}	[°C]	průměrná vnitřní teplota
t_{em}	[°C]	střední venkovní teplota v době vytápěcí sezóny
Q_C	[W]	celkové tepelné ztráty
Q_{TV}	[kWh]	výpočet potřeby tepla na ohřev TV za den
E_{2p}	[kWh]	součet tepla v dávkách
Q_{cel}	[kWh]	celková potřeba tepla
ε_n	[-]	součinitel nesoučasnosti
ε_r	[-]	součinitel regulace
ε_u	[-]	součinitel útlumů teplot
ε_o	[-]	součinitel vlivu otopného systému
ε_t	[-]	součinitel zvýšení teploty
l	[m]	délka
S	[m ²]	plocha
τ	[hodin]	počet provozních hodin
P_e	[kW]	elektrický výkon
$E_{e,rok}$	[kWh]	roční výroba elektrické energie
$cena_{ST}$	[Kč]	cena za jednotku

Tyto symboly a zkratky jsou platné jen tehdy, není-li v příslušném textu uvedeno jinak. Jedná se především o symboly a zkratky označené stejným znakem nebo specifikované indexem.

1. Úvod

Předložená bakalářská práce s názvem „Návrh kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem pro rodinný dům“ se zabývá možností aplikace Stirlingova motoru pro zajištění tepelné a elektrické energie pro konkrétní rodinný dům. Téma bakalářské práce bylo vybráno s ohledem na rostoucí zájem odborné i laické veřejnosti o zařízení na kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie. Tento zájem je nepochybně vyvolán nejenom státní politikou subvencování elektrické energie z těchto zdrojů, ale zejména velkou výhodou, kterou je možnost vyrábět tímto způsobem energie v čase a o výkonu, který je požadován.

V rámci jednotlivých statí bakalářské práce jsou vysvětleny a popsány základní způsoby kombinované výroby elektrické a tepelné energie, včetně popisu technických principů fungování. Obecně zde lze najít popis kogenerace s postupným přechodem na výčet informací o kombinované výrobě elektrické a tepelné energie. V rámci odborných diskusí jsou tyto dva pojmy někdy rozdělovány a někdy jsou brány jako synonyma. V dalším je pozornost upřena na trigeneraci, chcete-li třígenerační výrobu tepla, elektřiny a chladu, a to z těch důvodů, že výroba chladu zejména v letním období výrazným způsobem napomáhá nasazení zařízení na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Zpracovatel této bakalářské práce se domnívá, že případná státní a evropská podpora třígenerační výroby v budoucím období jednoznačně napomůže efektivnímu využívání primární energie.

Je nepochybné, že velká pozornost je dále věnována historii vzniku a využívání Stirlingova motoru tak, aby mohl být přesně popsán jeho princip fungování. Vzhledem k tomu, že měl zpracovatel dostatek informací o Stirlingově motoru, pak se musela velká část práce věnovat výpočtu tepelných ztrát a komplexním energetickým bilancím konkrétního rodinného domu tak, aby mohl být navržen konkrétní Stirlingův motor daného výrobce a potřebného tepelného a elektrického výkonu.

Dle názoru zpracovatele je v budoucnu téma mikrokogenerace – Stirlingova motoru pro nasazení v privátní sféře zajímavé a bude se odvíjet jen od pořizovacích nákladů, pohybu cen zemního plynu a elektrické energie a v neposlední řadě od státní či evropské podpory kombinované výroby elektřiny a tepla.

2. Kogenerace

2.1. Princip kogenerace

V poslední době se v energetice mluví nejčastěji o úsporách, účinnosti a ekologizaci. Poptávka po dnešních energiích jako je teplo a elektřina strmě stoupá a je přímo úměrná zvyšování počtu obyvatel. Elektřinu a teplo můžeme vyrábět separátně, čímž ale využíváme malé množství energie uchované v palivu. Abychom co nejlépe využili energetický potenciál paliva, musíme zavést kogeneraci. Kogenerace je kombinovaná výroba tepla a elektřiny, kde se teplo jeví jako odpadní produkt při přeměně mechanické práce na elektrickou energii. Nejčastěji je kogenerace spojována se spalovacími motory nebo turbínami. Tím, že se vytvářejí dvě energie současně, dochází ke snížení spotřeby energetických zdrojů, zvýšení účinnosti až na 90% a také ke snížení emisních škodlivin, čímž přispívá k ochraně životního prostředí.

2.2. Výroba elektřiny a tepla

Zásobování distribuční sítě elektřinou nebo teplem je možné těmito způsoby:

- separátní výrobou elektrické energie,
- separátní výrobou tepla,
- kombinovanou výrobou tepla a elektrické energie.

2.3. Dělení kogenerační výroby

1. Podle výkonu:

- a. Mikrokogenerace do 50 kW_e
- b. Kogenerace malého výkonu do 1 MW_e
- c. Kogenerace středního výkonu do 50 MW_e
- d. Kogenerace velkých výkonů nad 50 MW_e

2. Podle paliva:

- a. Obnovitelné zdroje (biomasa)
- b. Neobnovitelné zdroje (zemní plyn)

3. Podle skupenství paliva:

- a. Plynné
- b. Kapalné
- c. Pevné

4. Podle účelu kogenerace:
 - a. Základní
 - b. Špičkovací
 - c. Záložní
5. Podle způsobu provozu:
 - a. Paralelní provoz
 - b. Ostrovní provoz
 - c. Záložní
6. Podle technologie:
 - a. Parní turbíny
 - b. Spalovací turbíny
 - c. Spalovací motory
 - d. Stirlingovy motory
 - e. Palivové články

2.4. Oblasti použití

1. Bazény, wellness zařízení a sportovní střediska

U bazénových komplexů je velkou výhodou 12 hodinový provoz denně během celého roku. Díky tomuto se dá dobře uplatnit kogenerační jednotka. Teplo je spotřebováváno pro ohřev bazénů, vytápění a ohřev TV. Elektrická energie slouží k pohonu čerpadel, wellness objektů nebo na osvětlení. Spotřeba elektrické energie je určujícím kritériem pro dimenzování jednotky.

2. Nemocnice

Provoz nemocnice bývá po celý rok stejný a to i co se týče provozu během dne. Poptávka po elektřině a teple tudíž bývá rovnoměrná. V tomto provozu je tedy velice výhodné nasadit kogenerační jednotky. Teplo během léta můžeme zpracovávat i na chlad v třígenerační soustavě. Kogenerační jednotky mohou plnit i funkci záskokových zdrojů v případě výpadku elektrické energie ze sítě.

3. Průmyslové podniky

Důležitým kritériem pro implementaci kogeneračních jednotek do průmyslových podniků je zajištění kontinuálního využití tepla nebo časový úsek za směnu. Nejlepší možností využití tepla je jeho upotřebení pro různé podnikové technologie. Dimenzování jednotky je proto prováděno v závislosti na potřebě tepla. V menších

podnicích je teplo využíváno pro ohřev TV nebo pro vytápění. Ve větších podnicích s teplovodním nebo s parním systémem slouží kogenerační jednotka jako předeřev otopné vody nebo přípravu páry. Elektrická energie je nejčastěji dodávána do sítě nebo se můžeme setkat s vlastní spotřebou v podniku tzv. ostrovní systémem.

4. Bioplynové stanice

Dnes už je poměrně časté využití kogeneračních jednotek v bioplynových stanicích. Jako palivo se využívá bioplynu vzniklého při procesu fermentace. Teplo se spotřebovává na ohřev fermentačních nádrží a pro vytápění přilehlých budov. Elektrina je většinou prodávána do sítě, což se jeví jako nejlepší řešení. Získáme peníze za odkup kWh a také za příspěvek na KVET.

5. Skládky komunálního odpadu

U skládek komunálního odpadu je jako palivo využíván tzv. skládkový plyn, který vzniká tlením odpadu. Teplo je dále využíváno pro proces tlení nebo pro přilehlé objekty. Elektrina je většinou prodávána do sítě.

6. Výtopny

Využití kogeneračních jednotek pro lokální výtopny má velký potenciál užití. Kogenerační jednotka je většinou navržena pro pokrytí části potřeby tepla, nejčastěji v rozmezí kolem 30 - 40% maximální spotřeby. Teplo slouží k ohřevu TV a pro vytápění v městských aglomeracích. Vyrobená elektrická energie je následně dodávána do sítě.

7. Obchodní střediska

Obchodní střediska jsou perfektním příkladem uplatnění kogenerační jednotky. Mají kontinuální provoz během celého roku. Elektrina je využívána pro chod ventilátorů a klimatizace a v neposlední řadě pro osvětlení objektu. Teplo je využíváno na vytápění, popřípadě na klimatizace.

8. Čistírny odpadních vod

V objektech čistíren jsou velmi výhodné podmínky pro výrobu tepla a elektřiny. Jako palivo se využívá tzv. kalový plyn, který vzniká jako produkt při procesu čištění vody. Teplem se vyhřívají nádrže s čistírenským kalem. Elektrina je spotřebovávána pro pohony technologických agregátů a čerpadel.

3. Kombinovaná výroba tepla a elektrické energie

Výrobu tepla nebo elektřiny můžeme zabezpečovat dvěma způsoby – odděleně (samostatná výroba tepla ve výtopnách a samostatná výroba elektrické energie v elektrárnách) nebo společně. Samostatná výroba elektrické elektřiny je v ČR realizována prostřednictvím elektráren, které pracují s kondenzačními turbínami. Účinnost se pak pohybuje v rozmezí 30-40%. Účinnost je závislá na parametrech admisní páry vstupující do turbíny, na druhu použitého paliva v parních kotlích a dalších provozních hodnotách. Dalším parametrem zvýšení účinnosti může být meziohřev mezi jednotlivými stupni turbíny.

Naopak u společné výroby tepla nejčastěji užíváme termín kogenerace. Kogeneraci můžeme získat mnoha způsoby. Existuje také speciální varianta kogenerace a to ta, že k výrobě tepla a elektřiny přibude ještě chlad. Potom hovoříme o trigeneraci.

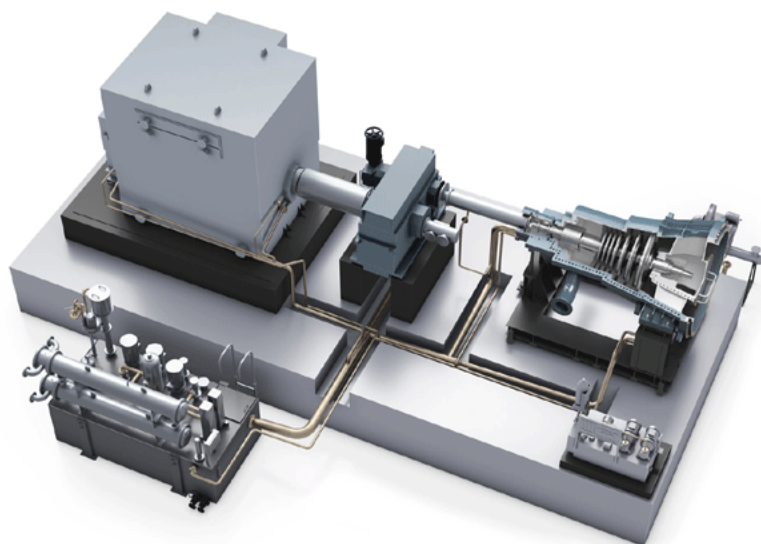
3.1. Parní kogenerační jednotky

Parní kogenerační jednotky (obr. 3-1) jsou poháněny přehřátou párou, která je vyráběna v parních kotlích. Parní kotle mohou spalovat pevná paliva (uhlí, biomasa), kapalná paliva (biopaliva, lehký topný olej, těžký topný olej) nebo plynná paliva (zemní plyn, koksárenský plyn). Hnací jednotkou může být protitlaká turbína, kondenzační odběrová turbína nebo parní motor.

Elektrický výkon turbíny závisí na:

- vstupních parametrech přehřáté páry (teplota, tlak),
- protitlaku v turbíně (tlak na výstupu z turbíny),
- termodynamické účinnosti turbíny,
- množství přehřáté páry vstupující do turbíny,
- účinnosti generátoru, mechanické účinnosti a spojkové účinnosti.

Generátor s turbínou bývá buď připojen přímo nebo přes převodovku (čelní nebo planetová převodovka). Pro nižší parametry páry nebo pro sytou páru můžeme použít parního motoru. Je potom možnost pracovat i s přehřátou párou. Parní motor je poháněn asynchronním generátorem, který může pracovat kondenzačně nebo do protitlaku. Sytou nebo přehřátou páru nám vyrábí parní kotle.



Obr.3-1 Parní turbína s generátorem [8]

3.2. Kogenerační jednotky s plynovou turbínou

Spalovací turbína (obr.3-2) se skládá ze tří částí:

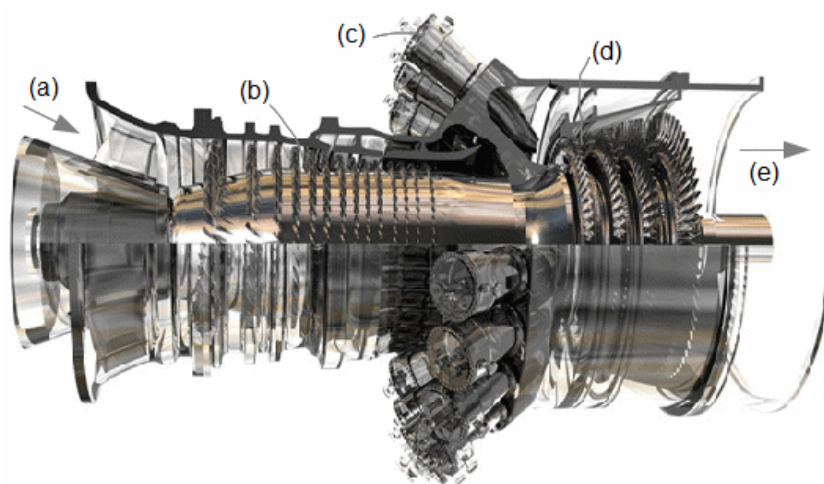
- a. z axiálního kompresoru – pro nasávání venkovního vzduchu a jeho stlačení,
- b. ze spalovací komory – přiváděno palivo (zemní plyn) a stlačený vzduch,
- c. z turbíny s řadou lopatek - dochází k expanzi spalin.

Do spalovací turbíny musí být přiváděn vzduch se značným přebytkem, aby se teplota spalin $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ snížila na rozmezí $900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$, což je přípustná mez z hlediska materiálu spalovací turbíny. Z turbíny vystupují spaliny o teplotě $450\text{--}600^{\circ}\text{C}$, které nadále můžeme využít k teplotěnským nebo technologickým účelům.

Spalovací turbína je na společné hřídeli se vzduchovým kompresorem, alternátorem a elektromotorem k najíždění celého soustrojí. Tedy část mechanické práce se využívá pro alternátor a kompresor.

Spaliny vycházející z turbíny můžeme zavést do spalínového kotle, ve kterém budeme vyrábět páru pro parní turbíny (protitlaké nebo kondenzační). Soustrojí složeného z plynové turbíny, spalínového kotle a parní turbíny se potom říká parní cyklus.

Velkou výhodou spalovacích turbín je možnost rychlého najetí, změny výkonu a možnost dodávky tepla v páře nebo horké vodě. Nevýhodou potom je vysoká hlučnost, použití ušlechtilých paliv a horší účinnost při nižším zatížení.



(a sání vzduchu; b turbokompresor; c spalovací komory; d turbína; e výstup spalin)

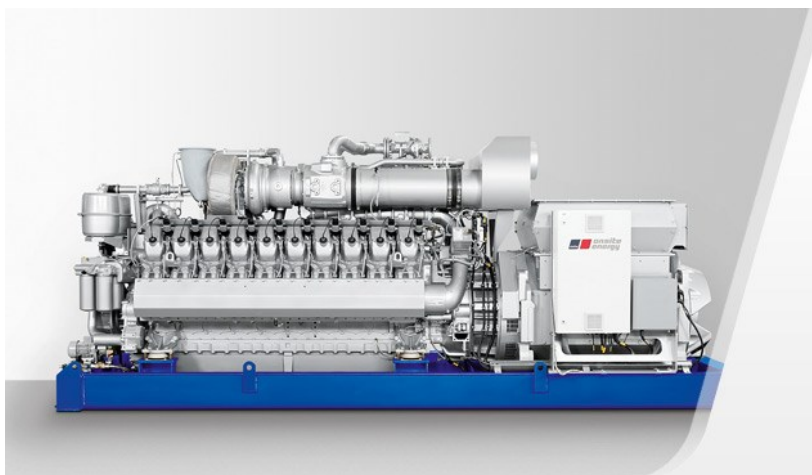
Obr.3-2 Řez spalovací turbinou společnost General Electric[9]

3.3. Kogenerační jednotky s pístovými spalovacími motory

Kogenerační jednotky s pístovými motory (obr. 3-3) jsou tvořeny spalovacím motorem, který pohání elektrický generátor, a soustavou tepelných výměníků. Výměníky využívají teplo z chlazení motoru a mazacího oleje (výměník glykol-voda nebo voda-voda) nebo tepla z výfukových spalin (výměník spaliny-voda). Spalovací motory jsou ve srovnání se spalovacími turbínami větší a složitější zařízení, navíc mají větší tepelnou účinnost.

Spalovací motory jsou tepelné stroje, které mění energii obsaženou v palivu při spalovacím procesu na mechanickou práci. Následně je v generátoru přeměněna na elektrickou energii. Generátory u nižších výkonů jsou asynchronní a u vyšších výkonů potom synchronní.

Velkou výhodou kogeneračních jednotek se spalovacími motory je rychlé spouštění, stálá pohotovost, vyšší účinnost, schopnost pracovat s nízkým tlakem plynu a možnost dálkového ovládání provozu. Nevýhodou potom je omezení výkonnosti (cca do 35 MW), malá možnost přetížení motoru, neustálé chlazení, nutnost častých servisních úkonů (výměna oleje), hlučnost, vibrace a neexistující možnost spouštění pod zatížením.



Obr.3-3 Kogenerační jednotka společnosti MTU na zemní plyn [10]

4. Trigenerace

U trigenerace tedy vyrábíme teplo, elektřinu a chlad. Nejčastějším využitím bývá kompresorové chlazení u klimatizovaných objektů. Velkou nevýhodou kompresorového chlazení bývá napájení elektrickou energií ze sítě. Lepší variantou je nahradit toto kompresorové chlazení absorpčním chlazením. Přitom je pak absorpční chlazení poháněno tepelnou energií z kogeneračních jednotek (nejčastěji z pístových motorů). Tímto řešením ušetříme elektrickou energii, navíc dosáhneme zvýšení účinnosti kogenerační jednotky tím, že prodloužíme provoz kogenerační jednotky přes letní měsíce.

Absorpční jednotka se skládá podobně jako kompresorové chlazení z výparníku a kondenzátoru. Největší rozdíl mezi kompresorovým chlazením a absorpčním je, že absorpční nevyužívá kompresor na elektrický pohon, ale tzv. „termokompresor“. Termokompresor je složen z absorbéru, vypuzovače a čerpadla. V absorbéru jsou páry chladiva odcházející z výparníku pohlcovány a vzniká „bohatý roztok“. Ten je dále čerpán do vypuzovače, kde se chladivo teplem z kogenerační jednotky vypudí z bohatého roztoku na „chudý roztok“ a páry chladiva. Páry chladiva kondenzují v kondenzátoru za odvodu tepla z chladících věží a po seškrcení na redukčním ventilu jsou opět nastříknuty do výparníku. Chudý roztok se přes škrcení vrací do absorbéru.

5. Mikrokogenerace

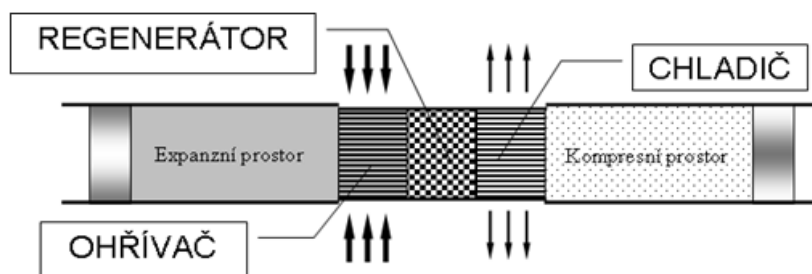
Termínem mikrokogenerace označujeme proces kombinované výroby tepla a elektrické energie pomocí kogeneračních jednotek s nízkým elektrickým výkonem, přibližně do 30 kW. U mikrokogenerace bývá teplo považováno za hlavní produkt, vedlejším produktem je potom elektřina. Jedná se o velice efektivní způsob vytápění a ohřevu teplé vody. Současně vyráběná elektrická energie je potom používána pro vlastní spotřebu nebo v ojedinělých případech prodávána do sítě. Vysoké celoroční vytížení jednotky je předpokladem správné implementace s vysokým potenciálem úspor.

6. Stirlingův motor

6.1. Obecně

Stirlingův motor je tepelný stroj (v minulosti označován jako teplovzdušný motor) pracující s cyklickým stlačováním a expanzí pracovního plynu (např. helia) nebo vzduchu. K výměně a regeneraci tepla dochází za stálého objemu (izochorická změna). Stlačováním pracovního plynu při nízké teplotě a následné expanzí pracovního plynu při vysoké teplotě probíhá transformace tepelné energie na mechanickou práci. Jde o motor s uzavřeným oběhem, se stálou náplní pracovního plynu a s regenerativním ohřevem. Uzavřený pracovní cyklus je definován tím, že stroj na počátku nenasává z okolí pracovní plyn. Pracovní plyn je hermeticky uzavřen ve válci. Nejčastěji se jako pracovní plyn používají inertní plyny, jako helium nebo vodík, kvůli jejich lepším tepelným vlastnostem. Na začátku cyklu je plyn stlačen a pak se ohřívá teplem z vnějšku, čímž dochází k expanzi a vykonání mechanické práce, následně je plyn ochlazen na původní teplotu. Výměna tepla s okolím probíhá přes tepelné výměníky - ohříváče a chladiče. U Stirlingových motorů (tímto se odlišuje od jiných teplovzdušných motorů) se dále využívá ještě regenerátor (obr. 6-1). Regenerátor je tepelný výměník, který uschovává tepelnou energii v době mezi expanzí a kompresí pracovního plynu. Velkou výhodou má tento motor díky přívodu tepla z okolí do systému. Proto je nejlepší variantou používat tento motor s jinými technologiemi, kde máme spoustu odpadního tepla, které bychom např. museli mařit. Proto se nejčastěji využívá s kogeneračními jednotkami nebo případně solárním systémem. Touto kombinací pak zvýšíme účinnost celého systému. Naproti tomu nevýhodou uzavřeného

systemu je netěsnost systému. Dochází k úniku pracovního plynu, který je potom nutno doplňovat.

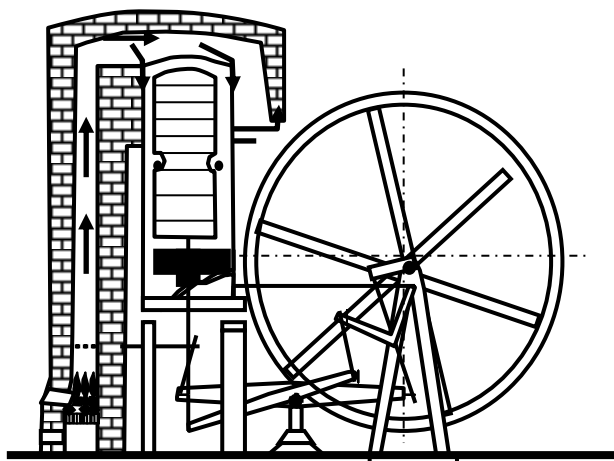


Obr.6-1 Schéma uspořádání Stirlingova motoru [11]

6.2. Historie

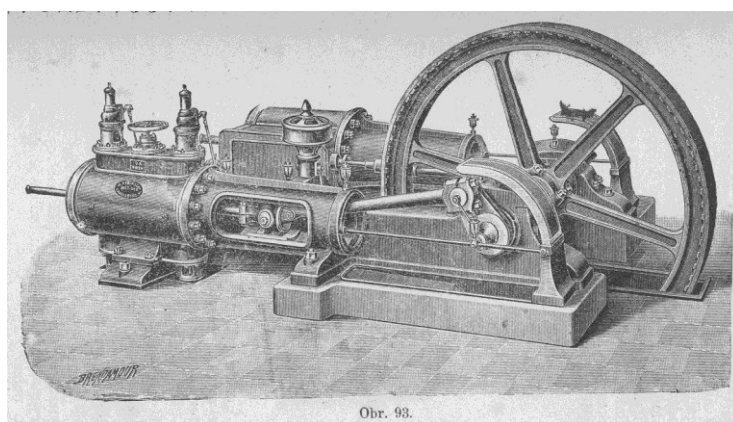
6.2.1 Vývoj

Stirlingův motor nebyl první teplovzdušný motor. Pouze se jednalo o vylepšení a zdokonalení stávajících typů. Stirlingův motor (patent se nazýval Stirlingův vzduchový motor) byl vynalezen reverendem Robertem Stirlingem v roce 1816 (obr. 6-2). V roce 1818 byl tento motor použit k odčerpávání vody z povrchových dolů (obr. 6-4). Nejdůležitější myšlenkou Stirlingova patentu byl tepelný výměník tzv. ekonomizér, který zlepšoval spotřebu paliva. Dnes už se pojem „ekonomizér“ nepoužívá, byl nahrazen pojmem regenerátor. Následný vývoj Roberta Stirlinga vyústil v patenty různých vylepšených uspořádání původního stroje. Asi největším zlepšením bylo zvýšení pracovního tlaku, což způsobilo v roce 1843 dostatečně vysoký výkon, aby mohl hnát všechny stroje ve slévárně železa ve skotském městě Dundee. Je předpokládáno, že stejně jako úsporou paliva byl vynálezce motivován snahou vytvořit bezpečnější motor namísto parního stroje. Nejčastější havárií byly exploze kotlů parních strojů, které v té době zranily nebo zabily mnoho lidí. Díky tomuto vynálezu se začalo motorům s vnějším spalováním říkat Stirlingovy motory. O toto pojmenování se zasadil Fleeming Jenkin v roce 1884. Tato kategorizace se ze začátku nechytila, proto jsme se mohli setkat s různými názvy jako Ridersovy, Robinsonovy nebo Henriciho vzduchové motory. Až ve čtyřicátých letech dvacátého století firma Phillips hledala vhodný název pro svůj teplovzdušný motor a pojmenovala ho Stirlingův motor.



Obr.6-2 Stirlingův motor podle patentového úřadu [12]

Stirlingův motor původně vznikl jako konkurence parního stroje (také motor s vnějším spalováním). Jako hlavní výhodou oproti parnímu stroji byla vyšší účinnost, menší nehodovost (u parních strojů docházelo k explozím) a neměl velké nároky na obsluhu a údržbu. Navíc motor nepotřeboval jako pracovní medium vodu, pracoval s relativně nízkými tlaky a teplotami a nebylo potřeba několikahodinové najíždění kotle na nahřátí vody na bod varu.



Obr.6-3 Wattův parní stroj [13]

Koncem devatenáctého století se zlepšila účinnost a především bezpečnost parních strojů. Proto už Stirlingův motor nebyl považován za přímého konkurenta. Parní stroje navíc dosahovaly vyšších výkonů (obr. 6-3). Nicméně asi od roku 1860 byly ve významném počtu vyráběny menší teplovzdušné Stirlingovy stroje pro takové aplikace, kde byl potřeba dostupný zdroj malého nebo středního výkonu, například pro čerpání vody nebo stlačování vzduchu. Tyto motory pracovaly na nižší teplotě, takže nekladly takové nároky na dostupné materiály, třebaže relativně nebyly tak účinné. Ale jejich obchodní výhoda byla v tom, že na rozdíl od parních strojů mohly pracovat bezpečně

při obsluze kýmkoliv, kdo byl schopen zacházet s ohněm. Pár typů zůstalo ve výrobě i po začátku dvacátého století, ale mimo několika málo mechanických zlepšení se v této době konstrukce Stirlingova stroje v zásadě nevyvíjela.



Obr.6-4 Stirlingův motor firmy Rider-Ericsson k čerpání vody [14]

6.2.2 Současnost

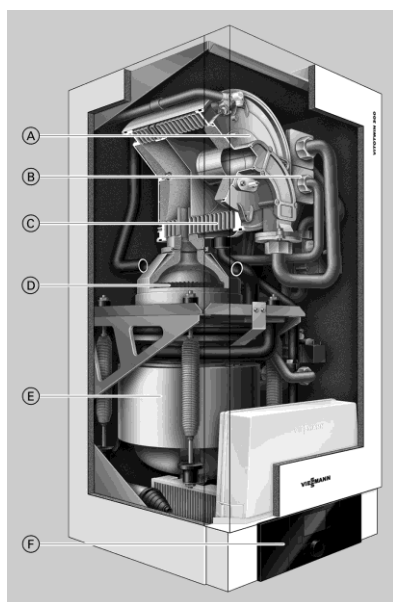
Začátkem dvacátého století byl Stirlingův motor postupně nahrazen elektromotorem a malým spalovacím motorem. Ve třicátých letech 20. stol. se používaly Stirlingovy motory k pohonu ventilátorů. Jak již bylo výše zmíněno, velké oživení přišlo až s firmou Phillips. Firma Phillips dostala vojenskou zakázku na výrobu radiostanic s velkým výkonem. Museli tedy najít nějaký vnější zdroj energie, aby radiostanice mohla fungovat i v oblastech bez elektrického proudu nebo kde nebyly dostupné akumulátory. Proto se firma rozhodla využít Stirlingova motoru jako tichého zdroje. Došlo také k velkým vylepšením. Jako pracovní plyn se začalo používat helium a atmosférické plnění nahradili plněním na vysoký tlak. Nasazení helia zvýšilo účinnost a umožnilo vyšší otáčky, přetlaková koncepce zvýšila měrný výkon.

Společnost Infinia v roce 1986 začala s vývojem pulsního Stirlingova motoru s volným pístem. Zveřejněný návrh používal jako pracovní plyn helium v hermeticky uzavřené nádobě pro dosažení větší spolehlivosti. Společnost shromáždila do roku 2010 přes 30 patentů. Vyvinula mnoho komerčních produktů pro kombinované topení nebo chlazení a pro výrobu elektřiny ze slunečního záření. V současnosti se uvažuje o využití Stirlingova motoru ohřívaného radioaktivním rozpadem pro generování elektrické energie na kosmických sondách, které budou zkoumat vnější oblasti sluneční soustavy.

V současnosti přibývá firem, které do své nabídky přidávají Stirlingovy motory nebo kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem.

Asi nejznámější je mikrokogenerační jednotka od společnosti Viessmann (obr. 6-5). Konkrétně se jedná o model VITOTWIN 300-W. Vznikla kombinací plynového kotle se Stirlingovým motorem typu Beta. Jednotka spaluje zemní plyn, kde je z plynového hořáku teplo odevzdáváno Stirlingově hlavě. Stirlingův motor je plněný heliem. Elektrický výkon je 1 kW, tepelný výkon 3,2-26 kW.

Za zmínku stojí také vývoj firmy Tedom z České republiky z roku 2002. Vyvinula jednotku s elektrickým výkonem 10 kW. Jednotka byla plněna heliem, typ Alfa a palivem byl zemní plyn. Bohužel jsou práce na tomto vývoji už ukončeny.



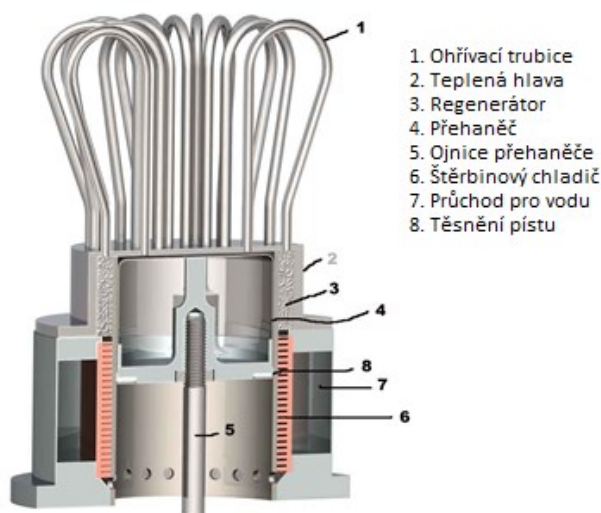
- A Kotel pro pokrytí špičkových zatížení
- B Ventil rozdělovače vzduchu
- C Topné plochy z ušlechtilé nerezové oceli
- D Kruhový hořák
- E Stirlingův motor
- F Regulace pro ekvitermně řízený provoz

Obr.6-5 Kogenerační jednotka firmy Viessmann [15]

6.3. Popis části Stirlingova motoru

6.2.3 Výměník tepla (Ohřívač)

V této části motoru se přivádí teplo z okolí. Následně probíhá rozpínání pracovního plynu, který tlačí na píst. U málo výkonných jednotek nám stačí jako ohřívač stěny válce teplého prostoru a popřípadě hlava válce. Pro lepší výměnu se užívá žebrování plochy, například příčného nebo podélného žebrování, anebo mnoho malých trubíc. Na předání tepla má velký vliv geometrie válce (výška a průměr). U motorů s vyšším výkonem obvykle toto provedení nestačí a ohřívač bývá proveden jako trubkový v nejrůznějších variantách.



Obr.6-6 Varianta provedení ohříváče [16]

Návrh tepelného výměníku Stirlingova stroje vyžaduje nalezení kompromisu mezi velkou plochou pro zajištění vysokého tepelného přenosu s malými tlakovými ztrátami a malým škodlivým prostorem (vnitřní prostor nevyužitý pro zdvih pístů). Ve strojích pracujících při vysokých výkonech a tlacích musí být tepelný výměník vyroben z materiálu, který dostatečně odolává mechanickému napětí, teplotě, korozi a deformaci.

Spalování paliva může být zdrojem tepla pro Stirlingův motor. Jelikož produkty spalování nejsou vystaveny styku s pracovním plynem a tedy ani s vnitřními částmi stroje, může Stirlingův motor pracovat i s takovými palivy jako například skládkové plyny, které by mohly poškodit jiné typy strojů. Dalšími výhodnými zdroji tepla mohou být odpadní teplo z technologických procesů nebo solární energie.

6.2.4 Regenerátor

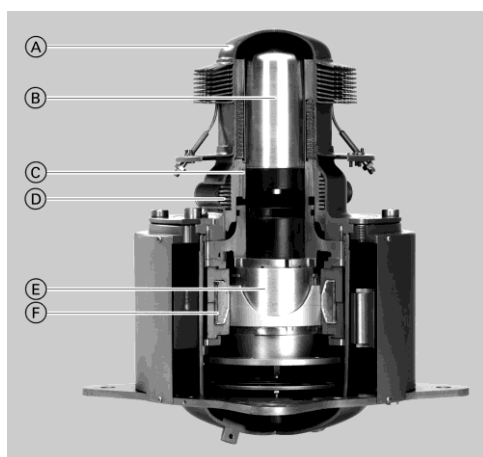
Regenerátor patří mezi jednu z nejdůležitějších částí Stirlingova motoru. Jedná se o tepelný výměník, který slouží jako zásobník tepla. Regenerátor je umístěn mezi teplým a studeným prostorem válců. Pracovní plyn jím střídavě protéká v obou směrech. Jeho nejdůležitější funkce směřuje k tomu, aby teplo nebylo vyměněno s okolím, čili abychom se účinností Stirlingova motoru co nejvíce přiblížili k účinnosti Carnotova cyklu. Jednodušeji řečeno - abychom měli co největší a co nejmenší teplotu oběhu (ΔT). Přítomnost regenerátoru se nám pozitivně promítne i na výkonu motoru.

Při konstrukci regenerátoru je důležité dosažení dostatečného tepelného výkonu a kapacity s minimálním přidaným objemem (škodlivý prostor) a odporem proudění. Konstrukce regenerátoru je tvořena jeho tělesem a náplní. Tvar závisí na konstrukci

celého motoru. V praxi bývá tvar nejčastěji válcový nebo mezikruhový. Průtok plynu je veden vždy ve směru osy. U některých konstrukcí plní funkci regenerátoru přemísťovací píst. Podíl stěn tělesa na regeneraci tepla je zanedbatelný, zásadní vliv má náplň, která bývá buďto kovová, nebo keramická. Základním úkolem náplně je schopnost akumulovat maximální množství tepla.

6.2.5 Výměník tepla (chladič)

Tak, jako tomu je u ohřívače, tak i u chladiče závisí parametry na výkonu motoru. U motoru s malým výkonem je chladič tvořen stěnami válce chladného prostoru. Někdy tento prostor může být žebrován, například příčným žebrováním nebo podélným žebrováním. Jako chladící medium se používá okolní vzduch. Naproti tomu u motorů s velkým výkonem je chlazení řešeno trubkovým výměníkem. Dosažení většího výkonu a vyšší účinnosti je podmíněno větším ΔT mezi chladičem a ohřívačem. Proto se jako chladící medium užívá voda nebo jiná kapalina. V některých případech se tato chladící voda může použít dále na vytápění, např. u rodinných domů.

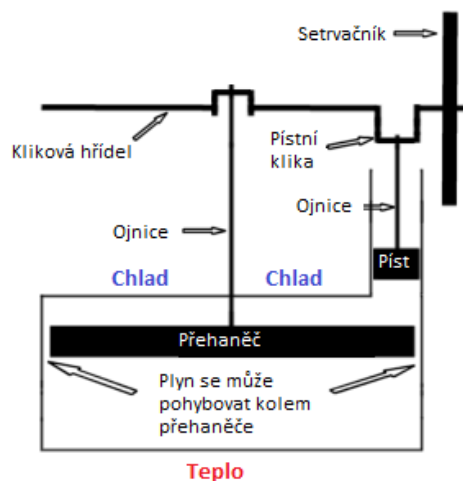


- A Stirlingova hlava
- B Přemísťovací píst
- C Regenerátor
- D Prostor chlazený vodou
- E Pracovní píst
- F Generátor

Obr.6-7 Řez Stirlingovým motorem společnosti Viessmann [17]

6.2.6 Přemísťovací píst

U konfigurací beta a gama se u motoru nachází ještě speciální píst, který nazýváme přemísťovací píst (obr 6-7). Ten nám slouží k dopravě pracovního plynu mezi teplým a studeným prostorem a naopak. Přemísťovací píst může být umístěn ve válci, kde se nachází pracovní píst, nebo je pro něj vytvořen vlastní válec. Přemísťovací píst umožňuje pracovnímu plynu kolem sebe proudit nebo je utěsněn s válcem a pouze přesouvá pracovní plyn přes výměníky a regenerátor (obr. 6-8).

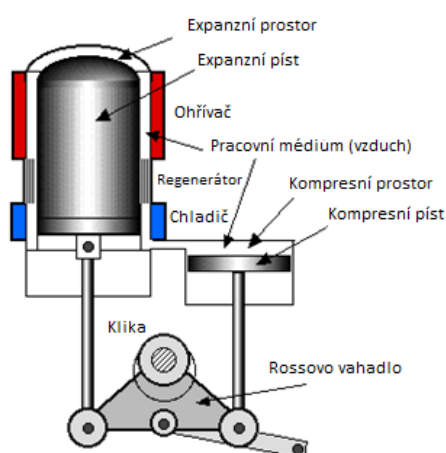


Obr.6-8 Schéma Stirlingového motoru s přemísťovacím pístem [18]

6.4. Typy konfigurací Stirlingova motoru

Existují různé typy konfigurací Stirlingova motoru. Mezi ně můžeme zařadit například tyto typy speciálních provedení:

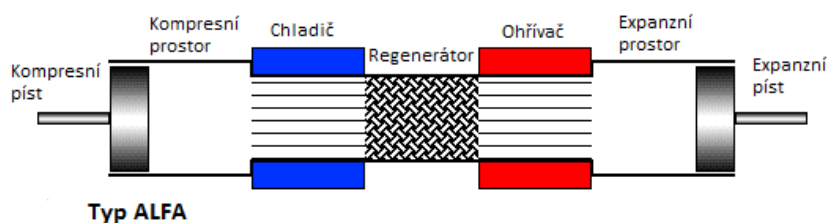
1. rotační Stirlingův motor, který přenáší výkon stroje na točivý moment. Bohužel tento typ se pohybuje pouze v teoriích, doposud nebyl vytvořen,
2. dvouválcový Stirlingův motor s Rossovým vahadlem (obr. 6-9). Jedná se o dvouválcový stroj s válci spojenými speciálním vahadlem. Tato konfigurace motoru byla vynalezena Andy Rossem,
3. kapalinový Stirlingův motor využívající hydraulický píst pro čerpání kapaliny,
4. a jiné další verze konfigurací, ve kterých se strojní inženýři předhánějí.



Obr.6-9 Konfigurace s Rossovým vahadlem [19]

6.2.7 Typ Alfa

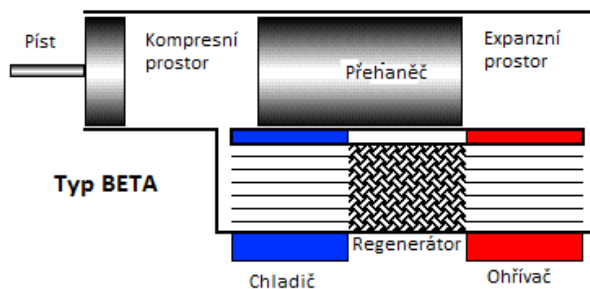
Tento typ má dva pracovní písty odděleny ve dvou válcích (obr. 6-10). Jeden válec slouží jako chladič (studený prostor) a druhý jako ohřivač (teplý prostor). Ohřivač s expanzním objemem pracuje s vysokými teplotami. Naproti tomu chladič s kompresním poměrem pracuje s nižšími teplotami. Díky velkému rozdílu teplot mezi ohřivačem a chladičem má tato konfigurace podstatně vyšší výkon a účinnost. Nevýhodou může být mazání pístu v teplém prostoru, jelikož zde se pracuje s vysokými teplotami. U konstrukcí bývá někdy i problémem velikost plochy pístu a k tomu těsnicí kroužek pístu, toto nám může způsobit zvětšení škodlivého prostoru.



Obr.6-10 Konfigurace Alfa [20]

6.2.8 Typ Beta

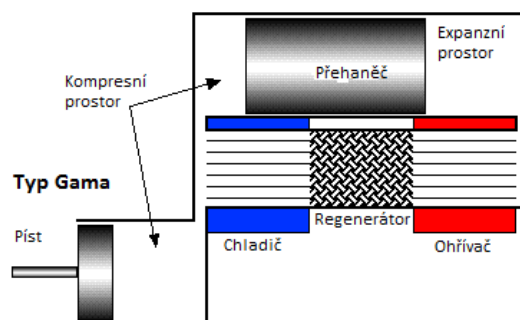
Tato verze oproti alfé má ještě zmíněný přemísťovací píst (obr. 6-11). Má pouze jeden válec, ve kterém je umístěn jak pracovní píst, tak i přemísťovací píst. Přemísťovací píst není těsněný. Při svém pohybu dopravuje pracovní plyn z teplého prostoru do studeného a naopak. Přemísťovací píst musí být dostatečně velký, aby zajistil účinnou izolaci teplého a studeného prostoru a přesunul dostatek pracovního plynu. Při svém pohybu přesouvá pracovní plyn z teplého prostoru do studeného a naopak. Při přesunu na teplý konec válce plyn expanduje a tlačí na pracovní píst. Při přesunu na studený konec se plyn komprimuje a setrvačnost stroje, obvykle setrvačník klikové hřídele, stlačí pracovním pístem plyn. Na rozdíl od konfigurace alfa nemá problém s mazáním.



Obr.6-11 Konfigurace Beta [21]

6.2.9 Typ Gama

Gama modifikace (obr. 6-12) má jako beta přemísťovací píst. Oproti beta konfiguraci je rozdělen pracovní píst a přemísťovací píst do vlastních dvou válců. Princip ale zůstává stejný jako u konfigurace beta. Tato modifikace má menší kompresní poměr. Z hlediska konstrukce je nejjednodušší.



Obr.6-12 Konfigurace Gama [22]

6.5. Rozdíl mezi vznětovým motorem a Stirlingovým motorem

Největším rozdílem je, že vznětové motory mají vnitřní spalování (otevřený cyklus). To znamená, že takovýto motor na počátku nasává vzduch z okolí. V další části cyklu po kompresi se vzduch míchá s palivem a dochází k spalení. Spaliny pak expandují a konají práci. Na konci cyklu se tyto spaliny zpátky odvádí do okolí.

Dalším rozdílem je ekologické hledisko. Zatímco vznětové motory mají větší emise, u Stirlingových motorů tomu tak není. Navíc se dá využívat i odpadní teplo z obnovitelných zdrojů, např. ze solárních kolektorů. Dále není tak výrazná spotřeba oleje jako u vznětových motorů. Například u dieselagregátů se musí zajistit stálý přísun oleje, proto se vytváří olejohospodářství. Vznětové motory ale dosahují vyšších výkonů (u kogeneračních jednotek i v řádu MW). Proto se Stirlingovy motory nevyužívají v automobilech, kvůli malému výkonu, velké pořizovací ceně a speciálním požadavkům na materiály a pracovní látky.

Nejčastěji se Stirlingův motor používá jako kogenerace. Tedy v kombinaci s jiným spalovacím motorem, kde využijeme odpadní teplo a přeměníme ho na elektrickou energii. Tím, že nedosahují velkých výkonů, mluvíme tedy o mikrokogeneraci, což znamená, že veškerá námi vyrobená energie je spotřebována v místě výroby. Nejčastějším příkladem je použití v rodinných domech. Tímto příkladem se budu dále zabývat v bakalářské práci, kde si vyzkouším implementaci Stirlingova motoru pro

rodinný dům. Dalšími poli použití může být kosmonautika nebo použití u válečných ponorek. Srovnání vznětových motorů a Stirlingových motorů je v tab. 6-1.

Vznětové motory	Stirlingovy motory
Okamžitý start (v řádu sekund)	Delší start (v řádu minut)
Velké rozměry	Menší rozměry
Větší nároky na údržbu	Menší nároky na údržbu
Vysoká spotřeba oleje	Nízká spotřeba oleje
Hlučnost	Tichý chod
Dokážou špičkovat	Vyžadují kontinuální provoz
Vyšší emise	Nížší emise
Neobnovitelná paliva	Obnovitelná paliva
Vysoký střední tlak	Nízký střední tlak

Tab. 6-1 Srovnání vznětových a Stirlingových motorů

6.6. Výhody a nevýhody Stirlingových motorů

V tomto odstavci si shrneme nejdůležitější pro a proti, se kterými se můžeme setkat u Stirlingových motorů.

Výhody:

- Můžeme využívat odpadní teplo ze spalování.
- Možnost kombinace s obnovitelnými zdroji energie (sluneční energie).
- Menší nároky na údržbu, pouze doplňování pracovního plynu.
- Nízké emise a tichý chod.
- Vyšší účinnost při nižších teplotách (v zimě), snadný chod.
- Stirlingův motor pro pohon čerpadla může být chlazen přímo čerpanou vodou.
- Mohou být použity pro kogeneraci v zimě a v létě pro chlazení.
- Teplo z chlazení je snadno využitelné pro vytápění.

Nevýhody:

- Pomalejší start (trvá déle, než se zahřeje).
- Velká cena – především kvůli použití speciálních materiálů.
- Složitý odvod tepla – nutnost nadimenzování chladiče (velikost) na nízkou teplotu odvodu.
- Nízké výkony.
- Kontinuální provoz – pro špičkování nutnost použití druhého spalovacího zařízení.

7. Řešený objekt

7.1. Popis objektu

Rodinný dům se nachází v Moravskoslezském kraji v obci Tísek. Jedná se o středně velký jednopodlažní dům. Dům se nachází v hornaté oblasti a zároveň není krytý ze dvou stran žádnými překážkami. Celkový užitná plocha domu je 345 m².

Stavební konstrukce použité v objektu splňují hodnoty požadovaného tepelného odporu konstrukcí, resp. součinitelů přestupů tepla stavebních konstrukcí podle normy ČSN EN ISO 6946. Hodnoty jednotlivých součinitelů tepelných vodivostí stavebních konstrukcí jsou uvedeny v tab. 7-1 až v tab. 7-4.

Každý objekt je z energetického hlediska charakterizován svými energetickými nároky (potřebami energie) a svou energetickou náročností (spotřebami energie). Energetické nároky jsou dány množstvím energie, které objekt pro svou funkci objektivně potřebuje. Energetická náročnost je faktické množství nakupované energie, které spotřebují pro svou činnost systémy, kryjící tyto energetické potřeby.

U výpočtu plochy střechy objektu bylo zanedbáno zkosení střechy.

Energetická bilance objektu má dvě základní složky:

- potřeba tepla na vytápění
- potřeba tepla na přípravu TV

Půdorys domu:

- Plocha podlahy: 345,5 m²
- Plocha střechy: 345,5 m²
- Plocha obvodového zdiva: 249,6 m²
- Plocha oken: 30,4 m²

Složení konstrukcí:

Pro obvodové zdivo je součinitel přestupu pro vnější a vnitřní stranu zdi roven

$\alpha_{\text{int}} = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_{\text{ext}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Složení obvodového zdiva je zaznamenáno v tab. 7-1.

Tloušťka	Typ izolace	Vlastnosti izolace
15 mm	Omítka vápenocementová	$\lambda = 0,88 \text{ W/mK}$
300 mm	POROTHERM 30 P+D - P15 nosná stěna	$\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$
120 mm	Polystyren pěnový - EPS, ČSN EN 13163	$\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$
15 mm	Omítka perlitová	$\lambda = 0,99 \text{ W/mK}$

Tab. 7-1 Složení obvodového zdiva

Pro podlahu je součinitel přestupu pro vnější a vnitřní stranu podlahy roven

$\alpha_{\text{int}} = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_{\text{ext}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Složení podlahy je zaznamenáno v tab. 7-2.

Tloušťka	Typ izolace	Vlastnosti izolace
10 mm	laminátová podlaha	$\lambda = 0,20 \text{ W/mK}$
120 mm	polystyrénová izolace	$\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$
300 mm	beton	$\lambda = 1,3 \text{ W/mK}$

Tab. 7-2 Složení podlahy

Pro střechu je součinitel přestupu pro vnější a vnitřní stranu střechy roven

$\alpha_{\text{int}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_{\text{ext}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Složení střechy je zaznamenáno v tab. 7-3.

Tloušťka	Typ izolace	Vlastnosti izolace
10 mm	dřevěné desky	$\lambda = 0,88 \text{ W/mK}$
200 mm	minerální vata	$\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$
30 mm	tašková izolace	$\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$

Tab. 7-3 Složení střechy

Pro okna je součinitel prostupu zaznamenán v tab. 7-4.

Typ izolace	Vlastnosti izolace
Plastová okna, izolační 2 – sklo s fólií	$k = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 7-4 Okna

7.2. Výpočet tepelných ztrát objektu

Pro návrh výkonu Stirlingova motoru bude zapotřebí nejprve spočítat potřebu tepla objektu. Ke stanovení potřeby tepla rodinného domu budeme muset vypočítat jeho tepelné ztráty. Pro stanovení potřebného výkonu Stirlingova motoru je tedy nutné stanovit tepelnou ztrátu jednotlivých krycích ploch a následně stanovením sumy pro celkovou tepelnou ztrátu rodinného domu.

Pro výpočet tepelných ztrát prostupem je použita obálková metoda dle normy ČSN 73 0540. Tepelná ztráta se vypočte pouze pro konstrukce obalu budovy. Jedná se o obvodové stěny, střechu, podlahu a výplně otvorů. Parametry objekty pro výpočet ztrát jsou uvedeny v tab. 7-5.

Město	Nadmořská výška [m]	Venkovní výpočtová teplota t_e [°C]	Vnitřní výpočtová teplota t_i [°C]
Nový Jičín	450	-16	20

Tab. 7-5 Údaje potřebné pro výpočet tepelných ztrát

Výpočet součinitele prostupu tepla:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{int}} + \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{ext}}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (1)$$

Výpočet tepelných ztrát:

$$Q_i = k_i * S_i * (t_i - t_e) \quad [\text{W}] \quad (2)$$

Výpočet tepelné ztráty pro obvodové zdivo:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,015}{0,2} + \frac{0,3}{0,14} + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,3}{0,99} + \frac{1}{25}}$$

$$k_1 = 0,22 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$Q_1 = 0,22 * 249,6 * (20 + 16)$$

$$Q_1 = 1977,07 \quad [\text{W}]$$

Výpočet tepelné ztráty pro podlahu:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{7,69} + \frac{0,01}{0,20} + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,30}{1,3} + \frac{1}{25}}$$

$$k_2 = 0,29 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$Q_2 = 0,29 * 345,5 * (20 + 16)$$

$$Q_2 = 2505,45 \quad [\text{W}]$$

Výpočet tepelné ztráty pro střechu:

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{7,69} + \frac{0,01}{0,88} + \frac{0,2}{0,14} + \frac{0,01}{0,04} + \frac{1}{25}}$$

$$k_3 = 0,11 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$Q_3 = 0,11 * 345,5 * (20 + 16)$$

$$Q_3 = 1368,49 \quad [\text{W}]$$

Výpočet tepelné ztráty pro okna:

$$Q_4 = 0,9 * 30,4 * (20 + 16)$$

$$Q_4 = 984,96 \quad [\text{W}]$$

Konstrukce	Veličina	Hodnota	Jednotka veličiny
Obvodové zdi	Prostup tepla (k_1)	0,22	$\text{W/m}^2\text{K}$
	Tepelná ztráta (Q_2)	1977,07	W
Podlaha	Prostup tepla (k_2)	0,29	$\text{W/m}^2\text{K}$
	Tepelná ztráta (Q_2)	2505,45	W
Střecha	Prostup tepla (k_3)	0,11	$\text{W/m}^2\text{K}$
	Tepelná ztráta (Q_3)	1368,49	W
Okna	Prostup tepla (k_4)	0,9	$\text{W/m}^2\text{K}$
	Tepelná ztráta (Q_4)	984,96	W
Celková tepelná ztráta	Q_C	6835,97	W

Tab. 7-6 Tabulka vypočtených prostupů tepla a tepelných ztrát

7.3. Výpočet roční potřeby tepla na vytápění

Výpočet potřeby tepla na vytápění vychází z dlouhodobých sledování délky otopných období v ČR. Výpočet se provádí přes denostupně. K výpočtu zahrneme opravné součinitele, které jsou uvedeny v tabulkách 7-7 až 7-11. Potřeba tepla na vytápění bývá velmi individuální u rodinných domků. Ve velmi dobře izolovaných (nízkoenergetických) domech bývá topná sezóna kratší. Pro bytové domy zásobované z CZT (centrální zásobování teplem) předepisují normy začátek topné sezóny tehdy, jestliže průměrná denní teplota poklesne po tři po sobě následující dny pod 13°C.

Výpočet denostupňů:

$$D = d * (t_{im} - t_{em}) \quad (3)$$

- $D = 3\,678$ denostupňů
- $d = 242$ dní (vytápěcí sezóny)
- $t_{im} = 19^{\circ}\text{C}$ (průměrná vnitřní teplota)
- $t_{em} = 3,8^{\circ}\text{C}$ (střední venkovní teplota v době vytápěcí sezóny)

Výpočet opravného součinitele:

$$\varepsilon = \varepsilon_n * \varepsilon_r * \varepsilon_u * \varepsilon_o * \varepsilon_t \quad (4)$$

$$\varepsilon = 0,8 * 1,04 * 0,84 * 1 * 1,12$$

$$\varepsilon = 0,78$$

Součinitel nesoučasnosti	ε_n
starší vícepodlažní domy	0,90
RD starší	0,85
moderní bytové domy	0,80
moderní a nízkoenergetické domy	0,75

Tab. 7-7 Součinitel nesoučasnosti

Součinitel regulace	ε_r
ruční regulace	1,10
termostat v referenční místnosti	1,04
ekvitermní regulace	1,00

Tab. 7-8 Součinitel regulace

Součinitel útlumů teplot	ε_u
vícepodlažní domy	0,95
rodinné domy	0,84
bez útlumu	1,00

Tab. 7-9 Součinitel útlumu teplot

Součinitel vlivu otopného systému	ε_o
teplovodní	1,00
teplovzdušný	0,95
sálavý	1,05

Tab. 7-10 Součinitel vlivu otopného systému

Součinitel zvýšení teploty	ε_t
zvýšení o 1°C	1,06
zvýšení o 2°C	1,12
zvýšení o 3°C	1,18

Tab. 7-11 Součinitel zvýšení teploty

Roční potřeba tepla:

$$E_v = (24 * Q_c * \varepsilon * D) / (t_i - t_e) \quad [\text{kWh}] \quad (5)$$

$$E_v = (24 * 6835,97 * 0,78 * 3678) / (20 + 16)$$

$$E_v = 13074,2 \quad [\text{kWh}]$$

7.4. Potřeba tepla na přípravu TV

Skutečná spotřeba TV je velice závislá na zvyklostech obyvatel rodinného domu, jejich životním stylu a počtu osob obývajících obytný prostor. Odhad množství tepla potřebného na přípravu TV je velmi nejistý a nedá se tak jednoduše stanovit jako u spotřeby tepla na vytápění.

U staveb pro bydlení norma ČSN 06 0320 počítá se spotřebou TV na 1 osobu s 0,082 m³/den, čemuž odpovídá spotřeba tepla 4,3 kWh/osobu za den. V praxi je spotřeba vody a tepla nižší a pohybuje se kolem 3 kWh/osobu za den.

Pro orientační určení množství tepla na přípravu TV jsem využil tab. 7-12, která vychází z platných norem.

Parametr	Značka	Jednotka	Baterie			
			Umyvadlo	Dřez	Sprcha	Vana
Počet dávek	n_d	-	3	0,8	1	0,3
Objem dávek	V_d	m ³	0,03	0,002	0,025	0,025
Teplo v dávkách	E_d	kWh	1,5	0,1	1,3	1,4
Součet objemu dávek	V_{2p}	m ³	0,082			
Součet tepla v dávkách	E_{2p}	kWh	4,3			

Tab. 7-12 Určení orientačního tepla na výrobu TV

Výpočet potřeby tepla na ohřev TV za den:

$$Q_{TV} = E_{2p} * počet_osob \quad [kWh] \quad (6)$$

$$Q_{TV} = 4,3 * 4$$

$$Q_{TV} = 17,2 \quad [kWh]$$

Výpočet potřeby tepla na ohřev TV za rok:

$$Q_{TV,rok} = Q_{TV} * 365 \quad [kWh] \quad (7)$$

$$Q_{TV,rok} = 17,2 * 365$$

$$Q_{TV,rok} = 6278 \quad [kWh]$$

7.5. Teplo od spotřebičů

Dům je vybaven velkým množstvím spotřebičů, které během svého provozu vyzařují teplo do okolí. O toto teplo bychom potřebu museli snížit. Teplo od spotřebičů nepřestavuje nějakou velkou hodnotu, proto toto teplo ve výpočtech zanedbáme.

7.6. Celková roční potřeba tepla

Celkovou potřebou tepla je myšleno všechno teplo, které bude potřeba vytvořit pro vytápění domu a ohřev TV.

Výpočet celkové potřeby tepla:

$$Q_{cel} = Q_{TV,rok} + E_v \quad [kWh] \quad (8)$$

$$Q_{cel} = 6278 + 13074,2$$

$$Q_{cel} = 19352,2 \quad [kWh]$$

8. Kogenerační jednotka Viessmann VITOTWIN 300-W

Podle celkové roční potřeby tepla jsem se rozhodl do řešeného objektu pro implementaci kogenerační jednotky VitoTwin 300-W od společnosti Viessmann. Jedná se o mikrokogenerační jednotky se Stirlingovým motorem. Výpočty jsou provedeny pouze pro Stirlingův motor. Špičkový kondenzační kotel nebude zahrnut do výpočtů. V následujících výpočtech se jednotku pokusíme aplikovat na křivku tepelného výkonu. Pokusíme se o co nejlepší provoz jednotky a poté vypočítáme návratnost investice.

8.1. Konstrukční provedení a funkce

Vitotwin 300-W (obr. 8-1) je přístroj mikrokogenerace s lineárním Stirlingovým motorem s volnými písty pro decentrální výrobu proudu a tepla a integrovaným kondenzačním plynovým kotlem jako kotlem pro pokrytí špičkových zatížení.



Obr.8-1 VitoTwin 300-W

Stirlingův motor je velmi tichý a bezúdržbový motor. Hermeticky uzavřený systém je naplněn pracovním médiem héliem. Hélium je v horní části ohříváno kruhovým hořákem a ve spodní části opět ochlazováno. Teplo vytvořené hořákem je prostřednictvím břitů přenášejících teplo odevzdáváno Stirlingově hlavě. Při plném zatížení je teplota v této oblasti cca 500 °C. Mezi horkou a studenou oblastí Stirlingova motoru se nachází zásobník tepla (regenerátor). Horní hradicí píst posunuje hélium střídavě mezi horkou a studenou oblastí tam a zpět. Tlakový rozdíl způsobený rozpínáním hélia pohybuje spodním pracovním pístem, jehož kinetická energie je

v generátoru přeměňována na elektrickou energii. Odpadní teplo Stirlingova motoru se dostane do výše umístěného výměníku tepla kotle pro pokrytí špičkových zatížení a je prostřednictvím topné vody používána k vytápění místností a ohřevu pitné vody. Studenou oblastí generátoru protéká topná voda (vratná větev). Zde vznikající teplo je odevzdáváno topné vodě. Kotel pro pokrytí špičkových zatížení má termický výkon 4,8-20 kW. Hořák Stirlingova motoru a kotel pro pokrytí špičkových zatížení jsou zásobeny společným plynovým potrubím a mají společný systém odvodu spalín.

Technické parametry	VitoTwin 30-W
Elektrický příkon	1 kW _{el}
Tepelný výkon Stirlingova motoru	3,2-5,6 kW _t
Jmenovitý tepelný výkon	3,2-26,0 kW _t
Provozní tlak	3 bar
Hladina akustického výkonu	54 db
Max. objemový tok	1200 l/hod
Frekvence (vyrobený proud)	49,5-50,3 Hz
Průměrné množství kondenzátu	11-13 l/den
NO _x	8,2 mg/kWh
Faktor primární energie	0,98

Tab. 8-1 Technické parametry VitoTwin 300-W

9. Křivka pokrytí tepelného výkonu jednotky

Pro výpočet křivky pokrytí tepelného výkonu jsem použil program společnosti Menergo a.s. Do programu jsem zadal hodnoty, které jsem zjistil výpočtem nebo jsem je našel v normách. Venkovní a výpočtové teploty a otopná období jsou kalkulovaná pro lokalitu Ostrava podle normy ČSN EN 12831. Zadané hodnoty jsou uvedeny v tab. 7-13.

Veličina	Hodnota	Jednotka veličiny
Výpočtová venkovní teplota	-15	°C
Teplota na začátku a konce vytápění	13	°C
Celková délka topného období	229	dnů
Průměrná teplota v otopném období	4	°C
Počet dnů v topném období	5	dnů
Průměrná vnitřní výpočtová teplota	20	°C
Počet dnů v roce	340	dnů
Roční spotřeba tepla pro přípravu TV	23	GJ
Parametry otopné soustavy	90/70	°C
Spotřeba tepla na vytápění	47	GJ
Jmenovitý instalovaný tepelný výkon	5,7	kW
Minimální instalovaný tepelný výkon	3,2	kW
Regulace výkonu od 100% do	56	%

Tab. 9-1 Zadané veličiny do programu

Účinnost obsluhy	ETAo
Kotle na tuhá paliva :	
rozvod nerozdělen na sekce	90,0%
rozvod rozdělen na sekce	92,0%
Kotle na plynná a kapalná paliva :	
rozvod nerozdělen na sekce	95,0%
rozvod rozdělen na sekce	100,0%
Oprav. souč. na snížení vnitřní teploty	et
nemocnice	1,00
bytové domy s nepřer. vytápěním	0,95
bytové domy s nočním přer. vytápěním	0,90
správ. OBT, obchody s velkou akumul.	0,90
správ. OBT, obchody s malou akumul.	0,85
školy s celoden. vyučováním	0,85
školy s poloden. vyučováním	0,80
Oprav. souč. na zkrácení délky provozu	ed
trvale vytápěné budovy (nemocnice, byty)	1,00
budovy s nedělním klidem (kancel., obchody)	0,90
školy	0,75

Obr. 9-1 Opravné součinitele

9.1. Výpočet v programu

Křivka trvání teplot pro vytápění tez = 13,0 °C; tev = -15,0 °C; te = 4,0 °C; ti = 20,0 °C; do = 229 dnů

		229	d	P1	P2	te
100.0%		229	1,000	0,000		13,0
90.0%		206	0,900	0,065		11,2
80.0%		183	0,800	0,129		9,4
70.0%		160	0,700	0,189		7,7
60.0%		137	0,600	0,247		6,1
50.0%		115	0,500	0,306		4,4
40.0%		92	0,400	0,366		2,7
30.0%		69	0,300	0,432		0,9
20.0%		46	0,200	0,508		-1,2
10.0%		23	0,100	0,610		-4,1
0.0%		0	0,000	1,000		-15,0

Výpočtová venkovní teplota: -15,0
 Teplota začátku a konce vytápění: 13,0
 Celková délka topného období: 229
 Průměrná teplota v topném období (°C): 4,0
 Počet dnů topného období: 5
 poměr dnů d/do: 0,0218
 Exponent 1: 1,1083
 Exponent 2: -0,626
 Poměr teplot: 0,7648
Venkovní teplota: -8,42

Potřebný výkon pro ÚT CELKEM Pmax = 5,2 kW; Pmin TO = 1,0 kW; Pstř = 2,4 kW

Teplotná ztráta OBT - max. tep. ztráta dle ČSN (kW): 6
 Průměrná vnitřní výpočtová teplota (°C): 20,0
 Vytápěcí denostupňe: 3 664
 Nesoučinnost teplotní ztráty infiltrací: 0,85 (0,8-0,9)
 Snížení teploty během dne respektive noci: 0,95
 Oprav. souč. na zkrácení doby vytápění: 1,00 (1-0,8, 7-5denní provoz)
 Opravný součinitel: 0,8075 (0,63 TSTV s hlavicemi)
 Účinnost obsluhy: 95,0% (0,9-1)
Spotřeba energie na vytápění (GJ/r): 47
Spotřeba energie na vytápění (MWh/r): 13
 Doba provozu soustavy ÚT (hod): 24,0
Průměrný tepelný výkon (MW), (kW): 0,00

Prépočet na referenční stav

Počet D° v referenčním roce: 3 500
 Počet D° ve skutečném roce: 3 664
 Spotřeba tepla na vytápění skutečná (GJ): 47
 Prépočet na referenční stav (GJ): 45

Hledej EXP1 tak, aby Qd2 = Qd1

Obr. 9-2 Zadávání do programu

Potřeba tepla pro přípravu TUV CELKEM Pstř = 0,8 kW Pz = 0,8 kW PI = 0,6 kW

Počet dnů v roce: 340
Roční spotřeba tepla pro přípravu TUV (GJ): 23
 Teplota ohřáté TUV (50 -60): 60,0
 Teplota studené vody v letním období (°C): 15,0
 Teplota studené vody v zimním období (°C) (5-10): 10,0
 Součinitel nerovnoměrnosti: 1,2
 Volba konstantního středního výkonu pro výpočet - S
 Doba provozu systému TUV: 24,0
 Počet dnů, hodin v topném a mimotop. období: 229
 Poměr rozdílů teplot: 0,900
 Roční spotřeba tepla pro přípravu TUV (kWh): 6 278
 Redukovaný počet dnů, hodin pro stanovení střed. den. výkonu: 229
Střední denní výkon pro využití 7 414 hod. (kW): 0,8
Maximální střední denní výkon pro využití 7 414 hod. (kW): 1,0
Střední denní výkon pro využití 8 160 hod. (kW): 0,8
Maximální střední denní výkon pro využití 8 160 hod. (kW): 0,9
 Podíl tepla pro přípravu TUV na roční dodávce tepla Qd (%): 32,3%

ZIMA Pz = 0,8 kW
 5 496
 4 654
 5 496
 0,8
 0,8
 1,0

LÉTO PI = 0,6 kW
 2 664
 1 624
 1 918
 0,8
 0,6
 0,7

Obr. 9-3 Zadávání do programu

Potřeba tepla pro krytí tepelných ztrát v tepelných sítích Pstř = 0,0 kW Pmax = 0,0 kW Pmin = 0,0 kW

Parametry otopné soustavy (°C):
 Výpočtová venkovní teplota (°C): 90
 Vnitřní pokojová teplota (°C): 70
 Střední teplota otopné vody max. - tstf max (°C): 80
 Střední teplota otopné vody min. - tstf min (°C): 20
 Směrnice otopné křivky (přímky): -1,7647
 Posunutí: 53,53
 Teplotní spád pro ohřev TUV (°C): 5,0
 Střední teplota otopné vody při začátku vytápění (°C): 30,6
 Střední teplota otopné vody potřebná pro ohřev TUV (°C): 55,0
 Ji odpovídající venkovní teplota: -0,8
Roční spotřeba tepla pro krytí tepelných ztrát (GJ): 0
Podíl tepelných ztrát na roční dodávce tepla Qd (%): 0,0%
 Mezní ztrátový výkon (kW): 0,0
 Střední ztrátový výkon (kW): 0,0
 Minim. ztrátový výkon (kW): 0,0

Stř.teplota topné vody jako Fce te

$y = -1,7143x + 54,286$

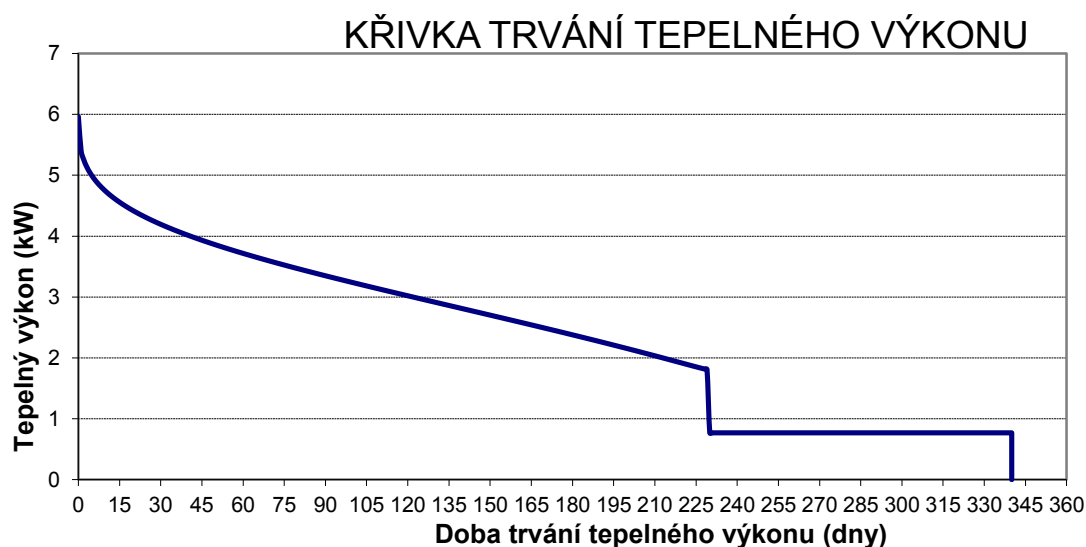
Obr. 9-4 Zadávání do programu

KRYTÍ POTŘEBY VÝKONU												
100% = 99,999%, CA pro požadovaný počet provozních hodin KGJ (Y 260)												
Řazení kotlů	ZDROJ TEPLA	JMEN. VÝK. INSTALOVANÝ (kW)	VYUŽITÍ JM. VÝKONU (%)	JMEN. VÝK. PROVOZNÍ (kW)	REDUKCE VÝKONU OD 100% DD	MINIMÁLNÍ VÝKON (kW)	Qd (GJ)	Hodnoty z výpočtu	Spotřeba tepla (GJ)	Potřebu může pokrýt kotel	Potřebu pokryje kotel	Spolupráce kotlů
	KGJ	5,7	100,0%	5,7	56,0%	3,2	35	35	100,0%			
	KGJ		0,0%	0,0	0,0%	0,0	0	0	0,0%			0
	K3		0,0%	0,0	0,0%	0,0	0	0	0,0%			0
	K4		0,0%	0,0	0,0%	0,0	0	0	0,0%			0
POTŘEBA 6,0	KRYTÍ POTŘEBY	5,7 kW	95,5%	5,7 kW			35 GJ	35	100,0%			
Rozdíl (zadáni - výpočet), přesnost výpočtu								-35 GJ		50,4%		
Kotly nekrytá spotřeba tepla v letním období (GJ)								35 GJ				

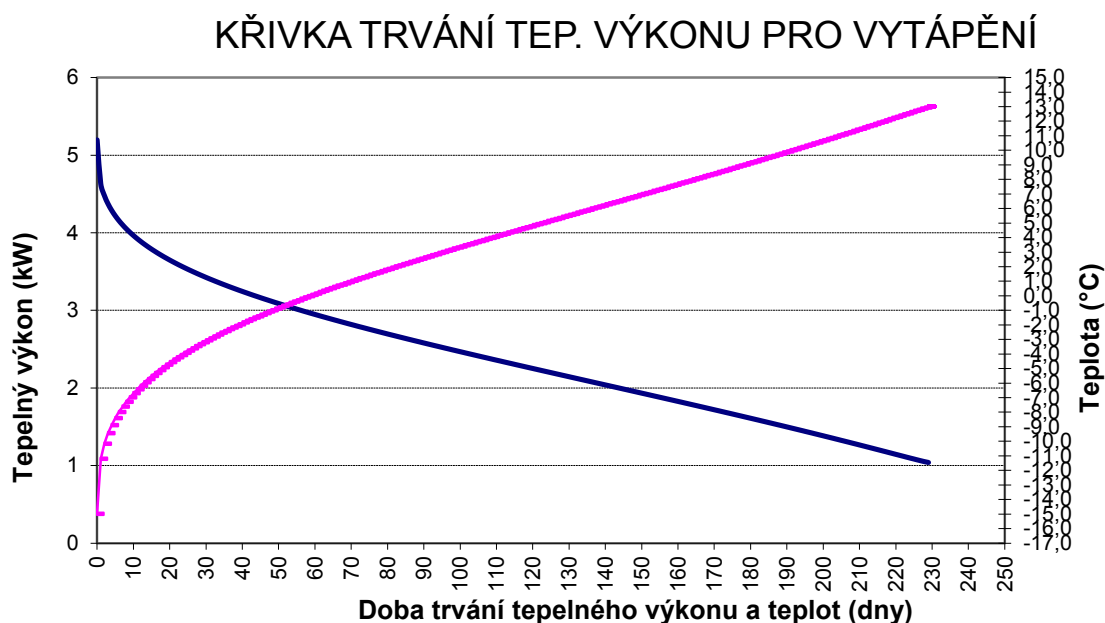
Obr. 9-5 Zadávání do programu

9.2. Křivka tepelného výkonu

Program nám vykreslil křivku trvání tepelného výkonu (graf 9-1).



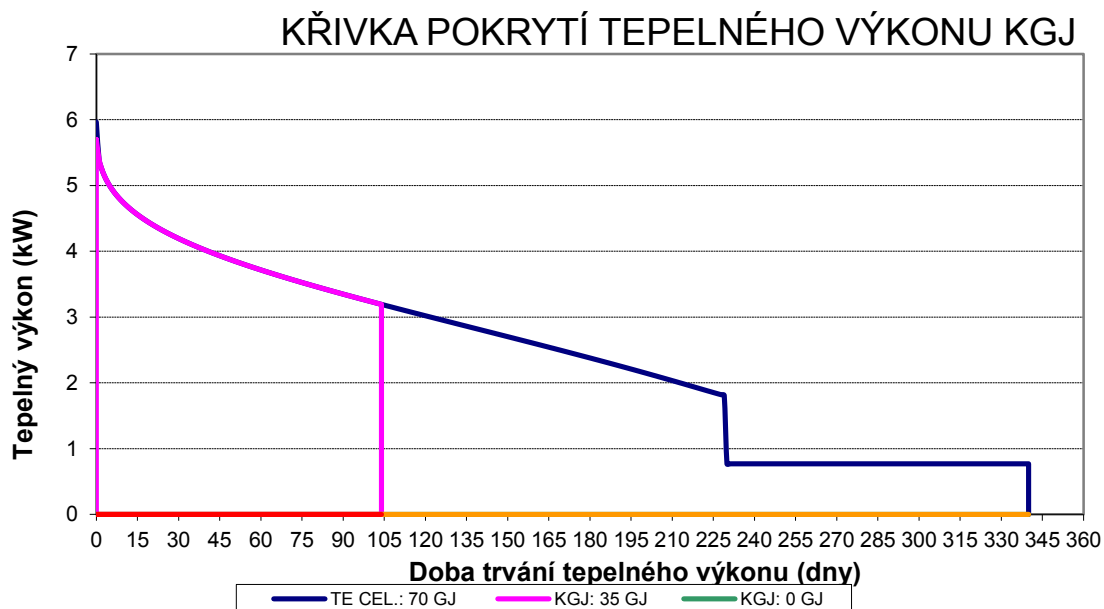
Graf 9-1 Křivka trvání tepelného výkonu



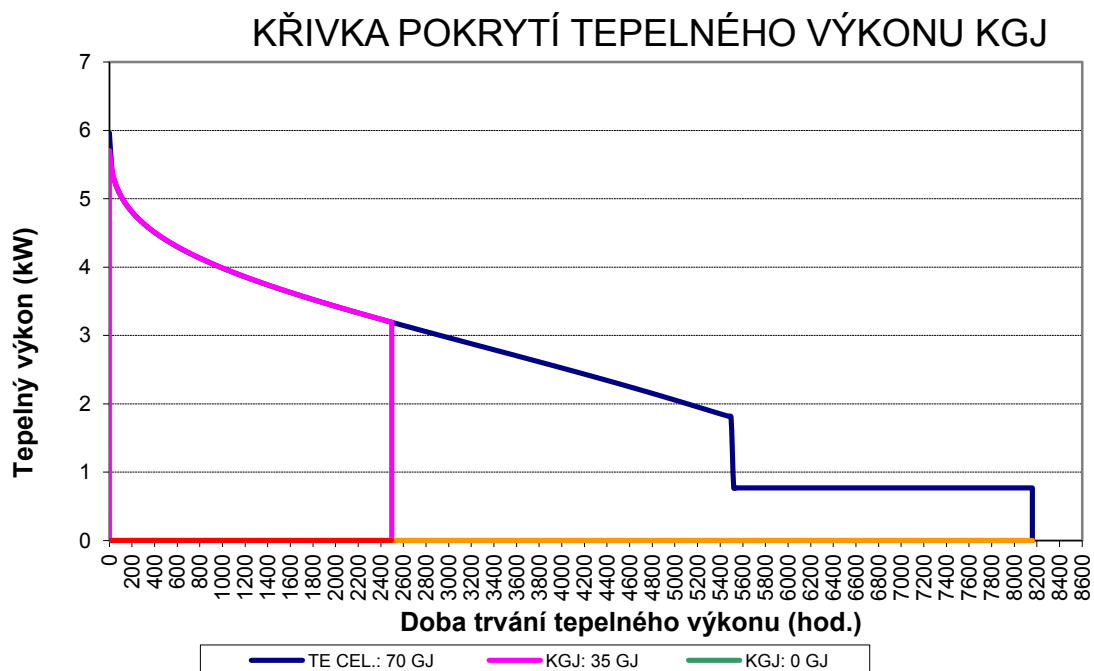
Graf 9-2 Křivka trvání tepelného výkonu pro vytápění

9.3. Provozní hodiny

Po dosazení jednotky do křivky tepelného výkonu jsme schopni zjistit počet provozních hodin jednotky za rok. Z křivky pokrytí tepelného výkonu jednotky (obr. 9-4) jsme tedy zjistili, že jednotka pojede 2 496 hodin. Což můžeme převést na dny (obr. 9-3).



Graf. 9-3 Křivka pokrytí tepelného výkonu pro dny



Graf. 9-4 Křivka pokrytí tepelného výkonu pro hodiny

10. Ekonomické zhodnocení instalace kogenerační jednotky

Následující zhodnocení bylo provedeno pro plynový kotel se Stirlingovým motorem od společnosti Viessmann typu Vitotwin 300-W. Roční provoz kotle bude 2 496 hodin. Instalace jednotky bude možná pouze tehdy, jestliže její investiční náklady se po dobu životnosti stroje navrátí. Kalkulovaná cena jednotky a periferií vychází na 150 000 Kč.

Údaje o energiích rodinného domu:

Spotřeba plynu/rok: 3000 m³

Spotřeba elektřiny/rok: 8000 kWh

Cena plynu/kWh: 1,9 Kč

Cena elektřiny/kWh: 4,5Kč

Provoz Stirlingova motoru:

- Plyn:

$$náklady_{ZP} = spotřeba_{ZP} * cena_{ZP} \quad [Kč] \quad (9)$$

$$náklady_{ZP} = 30000 * 1,9$$

$$náklady_{ZP} = 57000 \quad [Kč]$$

- Elektřina

$$náklady_{EE} = spotřeba_{EE} * cena_{EE} \quad [Kč] \quad (10)$$

$$náklady_{EE} = 8000 * 4,5$$

$$náklady_{EE} = 36\,000 \quad [Kč]$$

Roční výroba elektrické energie:

$$E_{e,rok} = P_e * \tau \quad [kWh] \quad (11)$$

$$E_{e,rok} = 1 * 2496$$

$$E_{e,rok} = 2496 \quad [kWh]$$

Cena za vyrobenou elektrickou energii:

$$cena_{ee} = E_{e,rok} * 4,5 \quad [\text{Kč}] \quad (12)$$

$$cena_{ee} = E_{e,rok} * 4,5$$

$$cena_{ee} = 24768 \quad [\text{Kč}]$$

10.1. Výpočet návratnosti se spotřebou elektrické energie

Takto vypočítaná návratnost je možná pouze tehdy, jestliže spotřeba elektrické energie rodinného domu bude více než 1 kW.

Výpočet úspory elektřiny:

$$úspora_{EE} = náklady_{EE} - cena_{ee} \quad [\text{kWh}] \quad (13)$$

$$úspora_{EE} = 36000 - 24768$$

$$úspora_{EE} = 11232 \quad [\text{kWh}]$$

Výpočet návratnosti:

$$návratnost = cena_{ST} / úspora_{EE} \quad [\text{let}] \quad (14)$$

$$návratnost = 150000 / 11232$$

$$návratnost = 13,36 \quad [\text{let}]$$

10.2. Výpočet návratnosti s prodejem elektrické energie do sítě

Takto vypočtena návratnost platí za předpokladu, že veškerou elektrickou energii dáváme do sítě. Cena za prodej elektřiny je 0,8 Kč/kWh. Navíc jsou stanoveny Energetickým regulačním úřadem příspěvky za kombinovanou výrobu tepla a elektřiny. Tyto příspěvky jsou uvedeny v obr. 10-1. Příspěvek státu na realizovaný stroj je 1610 Kč/MWh.

Srovnání podpory KVET formou ročních zelených bonusů v r. 2013 a 2014

Základní sazba ročního zeleného bonusu na elektřinu pro výrobu KVET s instalovaným výkonem do 5 MW (vč.).

Druh podporovaného zdroje (výroby)	Instalovaný výkon výroby [kW]		Provozní hodiny [h/rok]	Zelené bonusy [Kč/MWh] 2013	Zelené bonusy [Kč/MWh] 2014
	od	do (včetně)			
2013 - Kombinovaná výroba elektřiny a tepla s výjimkou výroby využívající obnovitelné zdroje nebo degazační a důlní plyn	0	200	3 000	2 010	1 610
	0	200	4 400	1 540	1 150
	0	200	8 400	670	220
2014 - Kombinovaná výroba elektřiny a tepla s výjimkou výroby uplatňujících podporu podle bodu (1) a/nebo (2.1.) cenového rozhodnutí a s výjimkou spalování komunálního odpadu	200	1 000	3 000	1 590	1 150
	200	1 000	4 400	1 190	750
	200	1 000	8 400	590	140
	1 000	5 000	3 000	1 220	800
	1 000	5 000	4 400	890	470
	1 000	5 000	8 400	500	45
Kombinovaná výroba elektřiny a tepla využívající obnovitelné zdroje energie nebo degazační a důlní plyn	0	5 000	8 400	45	
Kombinovaná výroba elektřiny a tepla společně spalující obnovitelné zdroje s neobnovitelnými zdroji a/nebo s druhotnými zdroji nebo neobnovitelné zdroje s druhotnými zdroji v procesu společného spalování	0	5 000	8 400	45	

2013 - Doplnková sazba I ani II se nevztahuje na spalování zemního plynu.

2014 – Doplnková sazba I k základní sazbě ročního zeleného bonusu za veškerou elektřinu KVET

Obr.10-1 Příspěvky na KVET [26]

Výpočet ceny za prodej elektřiny:

$$prodej_{ee} = cena_{odkup} * E_{e,rok} \quad [Kč] \quad (15)$$

$$prodej_{ee} = 0,8 * 2496$$

$$prodej_{ee} = 1996,8 \quad [Kč]$$

Příspěvek za KVET:

$$KVET = E_{e,rok} * BONUS \quad [Kč] \quad (16)$$

$$KVET = 2496 * 1,61$$

$$KVET = 4018,56 \quad [Kč]$$

Výpočet návratnosti:

$$návratnost = \frac{cena_{ST}}{prodej_{ee} + KVET} \quad [let] \quad (17)$$

$$návratnost = \frac{150000}{1996,8 + 4018,56}$$

$$návratnost = 24,94 \quad [let]$$

11. Závěr

V bakalářské práci s názvem „Návrh kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem pro rodinný dům“ bylo pojednáváno o možnosti aplikace Stirlingova motoru pro zajištění tepelné a elektrické energie pro konkrétní rodinný dům.

V úvodních statích bakalářské práce byly vysvětleny a popsány základní pojmy spojené s kogenerací - kombinovanou výrobou elektrické a tepelné energie, trigenerací, mikrokogenerací s detailním pohledem na Stirlingův motor a to včetně popisu technických principů fungování.

Vzhledem k tomu, že cíl bakalářské práce byl vlastní návrh kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem, pak následné kapitoly pojednávaly o výpočtech tepelných ztrát a o komplexních energetických bilancích zvoleného rodinného domu tak, aby mohl být navržen konkrétní Stirlingův motor o potřebném výkonu, který je k dispozici na trhu v České republice.

Pro nasazení vhodného typu zdroje je nutné spočítat tepelné ztráty objektu s tím, že tyto ztráty byly stanoveny obálkovou metodou. Touto metodou byly vyčísleny tepelné ztráty 6835,97 W a v porovnání s normou byly uznány za shodné. Následně byla stanovena potřeba tepla na vytápění daného rodinného domu na 13074,2 kWh a s připočtením tepla na ohřev teplé užitkové vody (6278 kWh) je celková potřeba tepla pro daný rodinný dům 19352,2 kWh.

Následně byl na základě výpočtového programu společnosti MENERGO a.s. porovnán potřebný tepelný příkon s možností zvoleného zařízení na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Po důkladné analýze byl vybrán výrobek společnosti VIESSMANN typového označení VITOTWIN 300-W, který s ohledem na výkonové parametry a cenové podmínky dodávky nejlépe splňoval požadavky pro nasazení pro zvolený rodinný dům. Výrobky jiných výrobců dostupných na Českém trhu nebyly dále posuzovány.

Zvolená mikrokogenerační jednotka VITOTWIN 300-W dosahuje elektrického výkonu o 1 kW s tím, že tepelný výkon je od 3.2 po 5.6 kW. V dalším nebylo počítáno s výkonem špičkovací kondenzační jednotky, která je součástí nabízeného produktu společností VIESSMANN a může dosáhnout dalšího tepelného výkonu až 20.3 kW. Tento výkon prakticky nahrazuje výkon špičkovacího plynového kotle, jehož výkon by

pokryl celou zbývající potřebu zvoleného objektu a to za předpokladu využití vhodně zvolené akumulace.

Zvolená jednotka na základě porovnání potřeby a jejího štítkového výkonu je schopna pokrýt 2 496 hodin výroby tepelné energie daného rodinného domu. Po vyloučení výkonu kondenzační části byla následně počítána návratnost investice, která byla stanovena na 13 let za předpokladu, že by se veškerá energie spotřebovávala v místě výroby. Za předpokladu, že by se vyrobená elektrická energie prodávala do sítě za danou výkupní cenu a s příspěvkem na KVET, tak byla návratnost stanovena na 22 let.

V případě, že by byla započítána i výroba s kondenzační částí zařízení VITOTWIN 300-W, pak lze očekávat mnohem výraznější zlepšení návratnosti celého zařízení. Vše může být výrazně vylepšeno instalací akumulace s přesnou regulací potřebného výkonu s ohledem na venkovní teploty a s ohledem na možnost využití tepla pro ohřev rodinného bazénu v letním období.

Na úplný závěr si dovoluje zpracovatel konstatovat, že tato bakalářská práce jednoznačně ověřila vhodnost nasazení mikorokogenarční jednotky na bázi Stirlingova motoru pro zásobování rodinného domu elektrickou a tepelnou energií. Přesto, že návratnost celé investice není pro soukromé investory zajímavá, pak lze tento atribut nahradit nízkými provozními náklady, dlouhou životností, zálohou elektrické energie a jednoduchostí obsluhy. V případě, že by byla započítána i výroba tepelné energie z kondenzační části a zároveň by došlo ke změně souvisejících parametrů (zelené bonusy, změna cen zemního plynu a elektrické energie), pak by investice pro soukromé investory byla hodně lákavá.

12. Seznam použité literatury

- [1] VLACH, Josef. *Teplárenství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972, 517 s.
- [2] MAYER, Jiří. *Energetické stroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1969, 556 s.
- [3] DVOŘÁK, Zdeněk. *Základy chladicí techniky*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986, 247 s.
- [4] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 281 s. ISBN 80-730-0118-7.
- [5] SENFT, James R. *An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines*. River Falls: Moriya Press, 1996, 88 s. ISBN 09-652-4551-9.
- [6] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice*. Brno: PC-DIR Real, 1999, 113 s. ISBN 80-858-9523-4.
- [7] BEALE, William. *Understanding Stirling engines*. Arlington: Volunteers in Technical Assistance, 1984. ISBN 08-661-9200-X.
- [8] Parní turbína s generátorem. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://www.siemens.com/innovation/en/news/2012/e_inno_1226_1.htm
- [9] Řez spalovací turbínou společnost General Electric. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ge-flexibility.com/products-and-services/gas-turbines/9f7-series-gas-turbine.html>
- [10] Kogenerační jednotka MTU na zemní plyn. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.mtuonsiteenergy.com/products/gas-generator-sets/continuous-power/natural-gas/>
- [11] Schéma uspořádání Stirlingova motoru. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.animatedengines.com/vstirling.html>
- [12] Stirlingův motor podle patentového úřadu. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.stirlinginternational.org/docs/presentations/history.asp>
- [13] Wattův parní stroj. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://minecraftmania.wz.cz/pictures-steam_engine.html
- [14] Stirlingův motor firmy Rider-Ericsson k čerpání vody. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.smokstak.com/forum/showthread.php?t=89036>
- [15] Kogenerační jednotka firmy Viessmann. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://www.viessmann.de/de/ueber_viessmann/portrait/innovationen.htm

- [16] Varianta provedení ohřívače. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://mac6.ma.psu.edu/stirling/design_ideas_by_others/SESUSA_2004/
- [17] Řez Stirlingovým motorem společnosti Viessmann. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://www.viessmann.de/de/ueber_viessmann/portrait/innovationen.html
- [18] Schéma Stirlingového motoru s přemíst. pístem. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://mac6.ma.psu.edu/stirling/design_ideas_by_others/SESUSA_2004/
- [19] Konfigurace s Rossoovým vahadlem. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>
- [20] Konfigurace Alfa. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>
- [21] Konfigurace Beta. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>
- [22] Konfigurace Gama. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>
- [23] Jednotka Viessmann VitoTwin-W. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://www.viessmann.de/de/ueber_viessmann/portrait/innovationen.html
- [24] www.viessmann.com
- [25] www.tzb-info.cz
- [26] www.eru.cz

13. Seznam tabulek a grafů:

Tab. 6-1 Srovnání vznětových a Stirlingových motorů	28
Tab. 7-1 Složení obvodového zdiva	30
Tab. 7-2 Složení podlahy	30
Tab. 7-3 Složení střechy	30
Tab. 7-4 Okna	30
Tab. 7-5 Údaje potřebné pro výpočet tepelných ztrát	31
Tab. 7-6 Tabulka vypočtených prostupů tepla a tepelných ztrát	32
Tab. 7-7 Součinitel nesoučasnosti	33
Tab. 7-8 Součinitel regulace	33
Tab. 7-9 Součinitel útlumu teplot	33
Tab. 7-10 Součinitel vlivu otopného systému	33
Tab. 7-11 Součinitel zvýšení teploty	34
Tab. 7-12 Určení orientačního tepla na výrobu TV	34
Tab. 8-1 Technické parametry VitoTwin 300-W	36
Tab. 9-1 Zadané veličiny do programu	37
Graf 9-1 Křivka trvání tepelného výkonu	39
Graf 9-2 Křivka trvání tepelného výkonu pro vytápění	39
Graf. 9-3 Křivka pokrytí tepelného výkonu pro dny	40
Graf. 9-4 Křivka pokrytí tepelného výkonu pro hodiny	40

14. Seznam obrázků:

Obr.3-1 Parní turbína s generátorem [8]	15
Obr.3-2 Řez spalovací turbinou společnost General Electric[9]	16
Obr.3-3 Kogenerační jednotka společnosti MTU na zemní plyn [10]	17
Obr.6-1 Schéma uspořádání Stirlingova motoru [11].....	19
Obr.6-2 Stirlingův motor podle patentového úřadu [12]	20
Obr.6-3 Wattův parní stroj [13]	20
Obr.6-4 Stirlingův motor firmy Rider-Ericsson k čerpání vody [14]	21
Obr.6-5 Kogenerační jednotka firmy Viessmann [15]	22
Obr.6-6 Varianta provedení ohřívače [16].....	23
Obr.6-7 Řez Stirlingovým motorem společnosti Viessmann [17].....	24
Obr.6-8 Schéma Stirlingového motoru s přemísťovacím pístem [18].....	25
Obr.6-9 Konfigurace s Rossovým vahadlem [19]	25
Obr.6-10 Konfigurace Alfa [20]	26
Obr.6-11 Konfigurace Beta [21]	26
Obr.6-12 Konfigurace Gama [22].....	27
Obr.8-1 VitoTwin 300-W [23].....	36
Obr. 9-1 Opravné součinitele.....	37
Obr. 9-2 Zadávání do programu	38
Obr. 9-3 Zadávání do programu	38
Obr. 9-4 Zadávání do programu	38
Obr. 9-5 Zadávání do programu	39
Obr.10-1 Příspěvky na KVET [26].....	43